

## Sensör Esaslı Çelik Üretim Proses Kontrolü ile Çelik Üretiminde Verimlilik Artışı

**Randall P. Stone**  
Senior Products Applications Manager  
Heraeus Electro-Nite Co.  
Langhorne, PA, USA  
Ph. (215) 944-9000  
Fax (267) 685-4127  
[rstone@electro-nite.com](mailto:rstone@electro-nite.com)

**Ray M. Figas Jr.**  
Senior Products Applications Manager  
Heraeus Electro-Nite Co.  
One Summit Square  
1st Floor, Suite 100  
Langhorne, PA 19047  
Ph. 412-996-6149  
[rfigas@electro-nite.com](mailto:rfigas@electro-nite.com)

**Robert V. Branion**  
Principal Consultant  
Branion Associates, Inc.  
Valparaiso, IN, USA Ph.  
(219) 928-6948  
Fax 1-866-653-2554  
[r.remus@verizon.net](mailto:r.remus@verizon.net)

Anahtar Kelimeler: Sıcak Metal, Silikon Sensörü, Kükürt Sensörü, Oksijen Sensörü, Analizler, Desülfürizasyon, Alüminyum ile Deoksidasyon

### ÖZET

Çelikteki, düşük azot, inklüzyon temizliği ve alüminyum ve kükürt miktarlarının kontrolü talepleri, proses kontrolünün metalurjik cephesine bazı kısıtlamalar koyar. Halen mevcut ekipmanları kullanarak daha yüksek verimlilik elde etmek için, ürün verimini maksimize edilmeli ve proses zamanı azaltılmalıdır. Arzulanan kalite ve verimlilik hedeflerini başarabilmek için kükürt, silikon, curuf ve çelik oksijen aktivitesinin hızlı ve sensör esaslı gerçek zamanlı analizleri ve bu verilerden, kesin ve zamanında bilgi üretimi teknolojisi şimdi mevcuttur. Bu makale, öngörülen faydaları ile birlikte, mevcut proses kontrol sensörlerinin uygulamasını incelemektedir.

## ÖNSÖZ

Günümüzün çelik üretim dünyasında, üretimi artırmak ve maliyeti korumak; tüm çelik üretim prosesinin hızlandırılmasına yol açan ve böylece enerji tasarruf eden, metalik verimi maksimize eden ve sisteme ilave edilen bütün alaşım ve katkı maddeleri kullanımını optimize eden teknolojilerin uygulanmasını gerektirmektedir.

Genellikle proses, sıvı metalin kimyasal kompozisyonu veya sıcaklığı bilgisinin beklenmesi nedeniyle geçici olarak askıya alınır. Bu kimyasal kompozisyonun belirlenebilmesi için üç aşama gereklidir: 1) numuneyi almak; 2) numune hazırlama ve gönderme; ve 3) numunenin analizi. Bu analiz prosesi 8 ila 10 dakika arasında bir zaman alabilir. Bu zaman esnasında, netice bekleniyorken, operasyon normal olarak askıya alınmaktadır. Bu kritik aşamalarda, bir kimyasal sensör ve/veya bir oksijen aktivite daldırma sensörü (oksijen probu) kullanarak zaman kazanımı gerçekleştirilebilir.

Entegre demir çelik fabrikaları için, sıcak metaldeki kükürt ve silikonun çevrimiçi analizi gayesiyle kullanılacak iki yeni elektro-kimyasal sensör mevcuttur. Bunlar, daldırma oksijen sensörleriyle aynı tarzda çalışırlar ve halen birkaç büyük çelik işletmesinde üretim safhasında kullanılmaktadır. Silikon sensörü muameleden geçmiş sıcak metalde zamanında analiz sağlarken, kükürt sensöründe Mg-bazlı desülfürizasyonun hem öncesi ve hemde sonrasında, tüm aralıktaki kükürt ölçümlerini yapabilir.

Bazik Oksijen Fırını (BOF) çelik üretimi cephesinden bakıldığında, bu yararların sağlanmasında geniş çapta benimsenmiş sensör-bazlı teknik kullanımı, sublans ve TO sensörleri kullanımında azalma demektir. Bunlar, çelik sıcaklığı, oksijeni ve hesaplanmış karbon miktarı belirlemeleri için döküm öncesi rutin fırın yatırımları ve tekrar üflemleri önlemeyi sağlayabilir. Bu, üretimi ve verimde artış sonucunu getirir, ve, çelik sıcaklığının muhafazası ve hurda kullanımının artırılması yoluyla, elde mevcut sıcak metalden daha fazla çelik elde edilmesini sağlar. Bu hurda kullanım faktöründeki artış, tesisin sıcak metal yönünden kısıtlandığı durumlarda özellikle avantajlıdır.

Çeliğin deoksidasyon kontrolü için, kombine sıcaklık ve oksijen problemleri (TO) kullanılabilir. Bu, hem Elektrik Ark Fırınları (EAF) ve hemde BOF çelik yapımı için geçerlidir. İlave olarak, çelik yapım fırını, döküm potası, veya Pota Metalurji Fırınından (LMF) herhangi birindeki oksijen seviyesi, alüminyum deoksidasyonunun kontrolünde kullanılabilir. Bu metodla alüminyum ilavesi, bir önceki döküm C/tekrar üfleme tahminine kıyasla daha doğrudur ve bir çelik numunesinin kimyasal analizini beklemekten daha çabuktur. Aynı zamanda, bu doğrulukta artış nedeniyle, kullanılan alüminyum miktarında düşürülebilir. Bu nedenlerle, oksijen probunun hız ve doğruluk yararları hem proses zamanını azaltır ve hemde çeliğin kalitesini düzeltir.

Curuf oksijen aktivite sensörü, EAF veya pota curuf/metal proses kontrolü için yeni kontrol stratejilerini olanaklı kılar. Aktivite ölçümünün eşzamanlı olması tabiatı, ki bu curufun FeO miktarı ile bağlantılıdır, çelik yapım curuf kimyasının kontrolü için bir ortam sağlar. Curufta FeO 'nun hassas kontrolünün, verimi artırmak, temizliği etkilemek, ve sürekli döküm makinasında alüminyum azalmasını önlemek potansiyelinde vardır. Günümüzde sıvı çelik yapımında, EAF fırın operasyonlarının optimizasyonu için çevrimiçi kontrolde, gereken kalite, temizlik ve rekabetçi fiyatta çelik üretiminde, hassas sensörler kullanılmaktadır. Modern çelik üretim proses kontrolünde pozitif etkisi olan çevrimiçi karar üretilebilmesinde, çelik ve curuf için hassas ve güvenilebilir daldırma sensörleri esas teşkil eder.

## SICAK METAL SİLİS VE KÜKÜRT ANALİZLERİ

Sıcak madenin anında silis ve kükürt aktivite ölçümleri, sıcak metal proses zamanını azaltır, sıcaklık kaybını azaltır, ve aynı zamanda BOF şarj model operasyonlarının doğruluğunu geliştirir. Sıcak metaldeki hem silis hemde kükürt için yeni, elementlere özel sensörler mevcuttur. Bu sensörler, geleneksel analizlere ihtiyacı ortadan kaldırarak, normal üretim operasyonlarını oldukça geliştirir. Silikon sensörü çabucak silikon değerini vererek BOF şarj modelinin doğruluğunu sağlar. Kükürt sensörü başlangıç ve final kükürt değerlerinin her ikisini de sağlayarak desülfürizasyon prosesinin kontrolünü mümkün kılar. Sonuçta net etki, tekrar üflemlerde azalma, verimin geliştirilmesi, ve tüm BOF proses zamanında kayda değer bir azalmadır.

Entegre çelik üretim operasyonlarında, silikon ve kükürt miktarının tayini için sıcak metalden numune alınır. Sıcak maden boşaltımına ara verildiği anda, veya ilk hesaplanan boşaltma ağırlığının % 90'ında, gereken final sıcak maden ve hurda ağırlıklarının şarj model hesaplamalarında kullanılmak üzere gerçek yüzde silisi elde edebilmek için bir numune alınır. Aynı zamanda, doldurmayı takiben, bu numunedan alınan kükürt analizi, başlangıç kükürt miktarı olarak kabul edilir. Numuneyi almak, hazırlamak ve analiz etmek için gereken zaman dikkate alındığında, bu analiz beş ila sekiz dakika arasında zaman alabilir. Zaman cezasına ilave olarak, bununla bağlantılı sıcak metal sıcaklık kaybı (yaklaşık olarak 1°F/dakika) ve kimyasal analizler için işçilik maliyeti vardır. Tipik sıcak maden transfer ve desülfürizasyon operasyonunun detayları aşağıdaki klasik proses adımları özetinde gösterilmiştir.

### Klasik Pratik:

- Sipariş edilen sıcak metalin % 90'ını boşalt.
- Daldırma probu ile Sıcaklık/Numune al.
- Yüzde silikon için analiz yap ( X-Ray Florescence (XRF) veya Spectrograph ile).
- % Si neticesi için geçen zaman yaklaşık 8 dakika.
- Final döküm şarj balansı hesapla, gerekli son sıcak metal ve hurdayı sipariş et ve boşalt.
- Potayı desülfürizasyon istasyonuna transfer et.
- Başlangıç kükürt numunesi al.

- Desülfürizasyon enjeksiyonuna başla.
- Başlangıç kükürt analizini al (XRF veya yakma analizi ile) ~ beş ila sekiz dakika.
- Desülfürizasyon enjeksiyonunu tamamla ve karıştır.
- Final kükürt analiz numunesini al.
- Sıcak metal potasının curufunu sıyr.
- Final kükürt analizini al ( XRF veya yakma).
- Kükürt analizi için geçen zaman yaklaşık beş dakika.
- Gerekirse tekrar desülfürize et.
- Sıcak madeni BOF'e gönder.

Konvansiyonel proses adımlarıyla tabii olarak oluşan sıcaklık ve zaman cazasının, toplam desülfürizasyon zamanına göre, etkisinin detayları aşağıdaki Tablo 1' de görülebilir. Bunları, zaman kazandıran sensörlerin uygulandığı hallerde beklenen zaman kazancı ile karşılaştırırız.

**Tablo I: Çeşitli Test Teknikleri için Proses Zamanları ve Sıcaklık Kayıpları <sup>1</sup>**

Proses Adımı	Gereken Bilgi	Konvansiyonell Teknoloji		Sensör Teknolojisi		Sensör Teknoloji Avantajı	
		Zaman (Neticeler, dakika)	Sıcaklık (Kayıp, °F)	Zaman (Netice, dakika)	Sıcaklık (Kayıp, °F)	Zaman (Kazanç, dakika)	Sıcaklık (Kazanç, °F)
<b>Sıcak Metal Transfer Potası Dolumu</b>	Si, S; Temp	8	8	2	2	6	6
<b>Desülfürizasyon İstasyonu</b>							
Desülf Üfl.Sonu	S	5	5	1	1	4	4
Sıyırma Sn	S	5	8	1	2	4	6
<b>BOF'te toplam</b>							
Desülf üfl bitirme		13	13	3	3	10	10
Sıyırma bitirm		18	22	4	5	14	17
Tekrar enjeksiyon bitir	S, T	5	8	1	2	4	6
<b>Tekrar Muamelevi Bitirmek için Toplam</b>		<b>23</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>18</b>	<b>23</b>

Konvansiyonel proses, kimyasal analizin elde edileceği yaklaşık 18 dakikalık proses zamanını kapsar. Bu zamanın içinde, desülfürizasyon enjeksiyonu bittikten sonraki, inklüzyon yücürülmesini sağlamak için verilen 5 dakika karıştırmada vardır<sup>2</sup>. Eğer numune bu karıştırmadan önce alınır, numunedeki bulunabilecek curuf ve CaS inklüzyonları nedeniyle daha yüksek kükürt neticeleri elde edilebilir.

Transfer İstasyonu Silisi: Zaman için baskı yapıldığında, birçok operatör, transfer potasındaki karışık sıcak metalin yüzde silis miktarını hesaplamak için Yüksek Fırın sıcak metal silis analizlerini kullanır.

Ancak, bu değer, özellikle eğer sıcak metal numunesi torpito arabası yerine Yüksek Fırın yolluğundan alınmışsa, hata yapmaya açıktır. Şarj hesaplaması için kesin olmayan silikon verisinin, oldukça ileriye matuf birçok etkisi vardır ki bunlar verimsiz curuf kimyası, taşma, kötü fırın yatırma performansı, fırın tekrar üflemleri veya üfleme kesmeden sonra soğutmadan kaynaklanan verim ve zaman kaybıdır. Her fırın yatırmanın verim yönünden kabaca %1.5 maliyeti vardır<sup>3</sup>. Ayrıca her fırın yatırmanın bununla bağlantılı bir zaman kaybı da mevcuttur. Bunlara ilaveten, yeni bir kimyasal analizde gerekebilir ki neticede her fırın yatırma için 8 ila 10 dakikalık bir zaman diyeti ödenebilir. Son olarak, 3°F/Dak. mertebesinde veya 24 ila 30 °F bir sıcaklık kaybı da vardır. Sıcak metal veya çeliğin sıcaklık kaybı, ilk şarjdaki sıcak metal kullanımı yönünden özellikle önemlidir. Limitli sıcak madeni olan çelikhaneler için, hurda kullanımını maksimize edebilmek gayesiyle bu sıcaklık kayıpları minimize edilmelidir. Sıcak metal kullanımı tipik olarak şarjın yüzdesi şeklinde ifade edilir. Genelde bu değer yaklaşık olarak %72 ila %80 sıcak metaldir (veya sırasıyla %28 ila %20 hurdadır). Normal olarak, sıcak metal sıcaklığındaki 30°F bir artış, şarjdaki hurdada %1'lik bir artışa tekabül eder.

Kükürt: Gelen kükürt analizleri desülfürizasyon operasyonunu yönlendirir. Desülfürizasyon muamelesi hesaplamalarını başlatabilmek için, tipik olarak, dolu potadan, boşaltmayı keserek, veya ağırlıklı averaj numuneleri ( azalan doğruluk derecesiyle) alınır. Silis analizinde olduğu gibi, Yüksek Fırından alınan bilginin ağırlıklı averajı güvenilir olmayabilir. Çeşitli analiz teknikleri kullanılır,(yakma, Optik Emisyon Spektrometresi (OES) ve XRF) ve herbirinin kendine has maliyeti, limitleri ve özellikle zaman bedeli vardır. Genel olarak desülfürizasyon işlemine numune neticeleri rapor edilmeden önce başlanır, ve daha sonra, başlangıç %S neticesi elde edilince katkı malzemesi hesaplaması güncellenir. Maalesef, çoğu zaman, esas kükürt analiz neticesi gelmeden önce desülfürizasyon operasyonu tamamlanır; netice olarak ya gereğinden fazla katkı malzemesi harcayarak hedefin ötesine geçilir veya hedef tutturulamayarak ikinci bir desülfürizasyon operasyonu gerekir.

Eğer konvansiyonel numune alma ve kimyasal analiz rutinine bağlı çalışılıyorsa, desülfürizasyon devresinin sonunda, daha fazla geçikme ve maliyet ortaya çıkar. Klasik metodlar, numunede yüksek yüzdede kükürt ihtiva eden reaksiyon ürünleri (CaS ve/veya MgS) veya metale karışmış pota üstü curufunun hapsedilmesini önleyebilmek için, sıyırma sonrası numune almayı öngörür<sup>2,4</sup>. Bu, ilave gecikmeye sebep olur ve, sıyırma başlatıldığında, sıcak metal sıcaklık kaybında hızlanmaya yol açar (yüzeyi şimdi çıplak hale gelen metalden radyasyon dolayısı ile) . Bu nedenle, kükürt ihtiva eden non-metalik partiküllerin hapsedilebileceği nedeniyle neticenin daha yüksek çıkmaya eğilimli olduğu baştan bilinerek , birçok tesiste sıcak maden numunesi enjeksiyonun bitmesinden birkaç saniye sonra alınır; böylece sonuç dengesiz olabilir<sup>2,4</sup>.

Daldırma kükürt sensörü serbest kükürt atomlarının aktivitesini ölçer, bu nedenle, desülfürizasyon sonrası mevcut olan reaksiyon ürünlerine (örneğin; curuf, MgS, veya CaS) duyarlı değildir. Sonuç olarak, prob, ilave karıştırma yapılmadan sıyırmadan önce ve desülfürizasyonu hemen takiben, daldırılabilir. İşletme uygulamaları, final kükürt neticelerinin genel olarak geleneksel metodlardan daha düşük ve daha kesin olduğunu göstermiştir. Yeni sıcak metal daldırma sensörlerini kullanırken, sıcak maden boşaltma ve muamele operasyonları aşağıdaki şekilde organize edilebilir:

#### Geliştirilmiş Pratik:

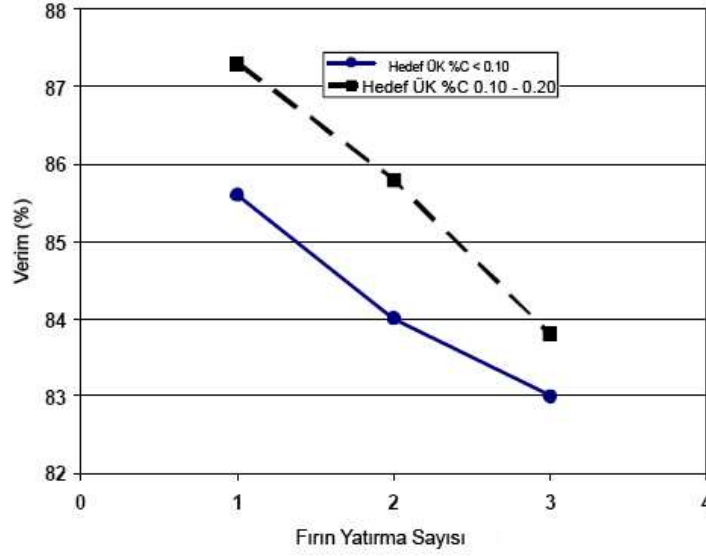
- Sipariş edilen sıcak madenin yaklaşık %90'nı boşalt,
- Prob ile Sıcaklık/Si numunesi al.
- % Si neticesi için geçen zaman yaklaşık 2 dakika.
- Final döküm şarj balansı hesapla, kalan sıcak metal miktarını sipariş et ve boşalt veya kutuya ilave hurda doldur.
- Potayı desülfürizasyon istasyonuna transfer et.
- Başlangıç kükürt probunu daldır, kükürt analizine yaklaşık 1 dakika.
- Desülfürizasyon enjeksiyonunu hesapla ve başlat.
- Desülfürizasyon enjeksiyonunu tamamla ve 1 dakika karıştır.
- Final sıcaklık/kükürt analiz numunesini al.
- Final kükürt analizini elde et, yaklaşık 2 dakika .
- Gerekiyorsa tekrar desülfürize et.
- Sıcak metal potasını sıyr.
- Sıcak metal potasını BOF'e gönder.

**Kazançlar:** Geliştirilmiş prosesler için zamanlamaların bir özeti Tablo I<sup>1</sup>'in orta kısmında gösterilmiştir: Tipik desülfürizasyon operasyonu için, geliştirilmiş proses ile sensör bazlı kimyasal analizler için toplam zaman sadece 4 dakikadır, bununla birlikte 5°F'lık bir sıcaklık kaybı vardır. Buna karşılık, geleneksel metodlar kullanıldığında 5 ila 8 dakikalık kayıp ve bununla birlikte 18-22°F'lık bir sıcaklık kaybı vardır. Tekrar enjeksiyon gerekli olduğunda, zamanlar ve sıcaklıklar, 5 dakika ve 7°F'a karşılık sırasıyla 23 dakika ve 30 °F dır.

Geliştirilmiş proses için zaman ve sıcaklık kazançları Tablo I<sup>1</sup>'in son iki kolonunda gösterilmiştir: Normal desülfürizasyon operasyonu için 14 dakikalık zaman kazancı, ve 17°F sıcaklık kazancı olabilecektir. Bu sıcaklık kazançları, BOF şarjındaki sıcak metal kullanımında yaklaşık %6'lık bir azalmaya denk gelmektedir. Eğer final kükürt numunesi 5 dakika yerine 1 dakikalık karıştırma ile alınsaydı; o takdirde zaman kazancı 10 dakika ve sıcaklık kazancı 13°F olabilecekti. Bu sıcaklık artışı, sıcak metal şarjında yaklaşık %0.4 kadar azalmaya denk gelmektedir.

### ÇELİK OKSİJEN AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ

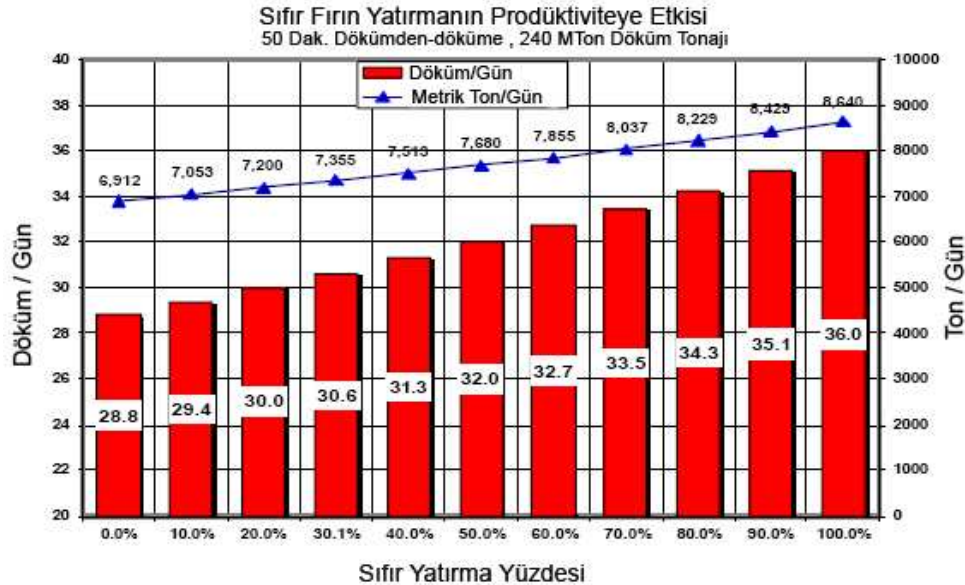
Çözünmüş veya serbest oksijenin, ppm veya konsantrasyonun milyonda parçası olarak raporlanan, çelik oksijen aktivite ölçümleri, hem EAF hemde BOF fırınlarından alınır. Sıcaklık ve oksijen aktivitesini tayin etmenin üç metodu vardır: 1) sublans ; 2) TO (sıcaklık ve oksijen) sensörü daldırma; veya 3) normal daldırma oksijen probu. Tipik olarak, BOF çelik yapımında, fırın yatırma sayısını azaltmak için, sublans veya daldırma TO sensörleri üflemenin ince ayarını yaparlar. Bu, hem proses zamanını ve hemde fırındaki sıcaklık kaybını azaltırken, aynı zamanda fırın verimini ve refrakter aşınmasını iyileştirir. Oksijen sensör çıktısından türetilen bilgi, banyonun oksijen seviyesini belirlemede kullanılır, ve buradan, karbon seviyesi hesaplanır. Daldırma sensörü ikamesi, geleneksel karbon yakma analizi süresini kazandırır; numune alma, hazırlama, ve sevk zamanları dahil edildiğinde yaklaşık 5-8 dakika. Stelco Hamilton'dan, aşağıdaki Şekil 1 'de gösterildiği gibi, fırın yatırma sayısındaki bir azalmanın verim üzerimde önemli bir etkisi olabilir, çünkü her ilave fırın yatırma, averajda % 1.5 verim kaybına denk gelmektedir<sup>3</sup>.



Şekil 1: Fırın yatırma sayısının (tekrar üfleme) BOF verimine etkisi<sup>3</sup>

Sublans teknolojisi en kesin neticeleri sunarken, TO sensörlerinin kullanımı dökümden-döküme geçen zamanda 10 dakika ve, fırında averaj olarak 3 °F/Dak. kayıp hesabıyla, 30 °F kazanç sağlar<sup>3</sup>. Bu, üfleme sonunda TO sensörüyle ölçüm alarak, fırını sıcaklık ve kimyasal numune için yatırma elimine ederek gerçekleştirilir. Bu 30 °F'lık sıcaklık kazancı, sıcak metal yönünden limitli olan tesisler için, sıcak metal kazancıyla da eşleştirilebilir. Stelco-Hamilton'da, her 10 °F, sıcak madende 1000 pound azaltmaya eşitlenmiştir (hurdada artırma)<sup>3</sup>. Kantite olarak ifade etmek daha zor olsada, fırın zamanının azaltılması, fırındaki refrakter ömrünün uzatılmasıyla açık olarak ilişkilendirilebilir. Dubois, dökümlerinin % 80'inde sıfır yatırma ile refrakter ömründe % 20 artış meydana geldiğini raporlamıştır<sup>5</sup>.

Dökümden-döküme geçen zamanda 10 dakikalık bir azalmanın, BOF tesisinin verimliliği üzerinde güçlü etkisi vardır. Şekil 2'de verilen örnek, 50-dakikalık dökümden-döküme zamanı olan 240 metrik tonluk tek fırın içindir. Her dökümden fırın yatırıldığında, üretim günde 6,912 metrik ton, veya yaklaşık 29 döküm/gün dür. Dökümlerin % 50'si arada fırın yatırmadan yapılabildiğinde, produktivite 7,680 metrik tona veya 32 döküm/gün'e artırılabilir. Bu, üretimde, yaklaşık yüzde 10 artışı temsil etmektedir. Daha ileriye giderek, dökümlerin % 80'inde ara fırın yatırması yapılmazsa, üretim 8,229 metrik ton/gün'e veya 34 döküm/gün'e çıkmaktadır. Burada, produktivitede, yaklaşık yüzde 20'lik bir artış vardır.



Şekil 2: Sıfır yatırma yüzdesinin Produktiviteye etkisi

Aynı tesisde yüzde 10 veya 20 fazla üretim yapmanın, sabit yatırım maliyetleri değişmediğinden, önemli bir maliyet etkisi vardır. Bu üretim kapasitesinin mevcut sıcak metal kapasitesiyle elde edilebileceği varsayılarak, bu tek fırın, minimal bir maliyet yatırımı ile, %80 sıfır fırın yatırma oranında, üretimi 1,300 metrik ton/gün kadar artıracaktır. Ton başına 40\$ kar hesabı ile, gelirden günlük 50,000\$ USD kadar bir artış olabilecektir. Yıllık artış yaklaşık \$20 milyon USD olabilecektir.

### EAF OKSİJEN AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ

EAF operasyonlarında ise, proses kontrolü için kullanılan esas daldırma sensörü oksijen probudur. Sensör ölçümlerini alabilmenin yolları, el ile veya mekanik daldırma ile limitlidir. Daldırma oksijen probu ile ölçümlerin alınabileceği çuruf kapağı, yan duvar gibi değişik yerler mevcuttur. Mekanik sensör daldırma için bir manipatör kurulması, sensör ölçümleri alabilmeyi kolaylaştırır. Bunun bir avantajı daldırma derinliğinin ve çuruf/metal arayüzüne göre daldırma açısının tekrarlanabilir olmasıdır. Çelik banyonun oksijen aktivite miktarının belirlenmesiyle, EAF prosesinin geliştirilebilecek üç ana alanı mevcuttur:

1. Döküm karbonu hesaplaması.
2. Deoksidasyon ilave miktarlarının hesaplanması.
3. Maliyet Kazançları
  - a. Alışım tüketiminin azaltılması.
  - b. Kalite ve çelik temizliği için sapmaların azaltılması.
  - c. Zaman kazancı.

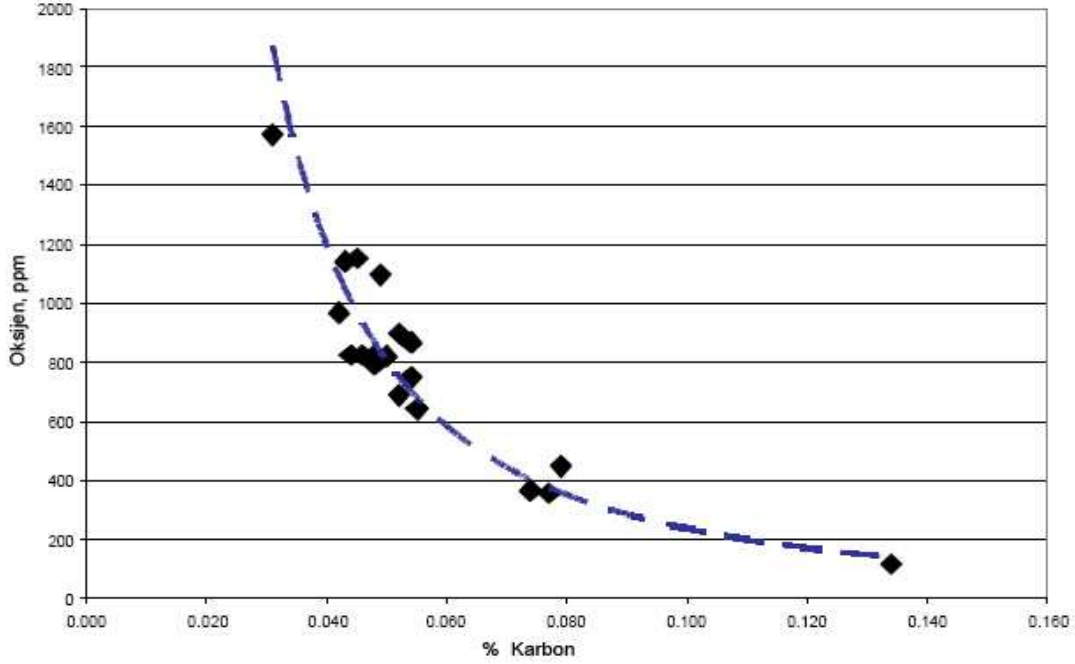
EAF prosesinde daha büyük miktarlarda oksijen kimyasal enerjisinin kullanılmaya başlamasıyla, BOF ve EAF arasındaki farklılık bulanıklaşmaya başlamıştır. EAF'de oksijen probu için uygulamalar, banyo karbonunun ve pota deoksidant ilavelerinin hesaplanmasıdır. Karbon ve oksijen aktivitesi veya karbon-oksijen (C x O) çarpımı arasındaki çok iyi bilinen bağıntı, milyonda parça olarak ölçülen (ppm) oksijen aktivitesi ile, yüzde karbon miktarının çarpımı olarak tarif edilebilir. 2900 °F'da tipik bir C x O sonucu şu şekildedir:

$$[C] [O] = 640 \text{ PPM} \times 0.05 \%C \text{ veya } 32.00 \quad (1)$$

Her çelikhanenin hafifçe değişen değerleri vardır, ve oksitleyici lokal şartlar nedeniyle, her zaman teorik dengeden daha yüksektir. Konvansiyonel eriyik karbon tayini, fırından bir numune alınmasını ve hazırlama ve analiz için laboratuvara gönderilmesini gerektirir. Bu proses 2 ila 10 dakika arasında bir zaman alabilir. Branion'dan alınan Şekil 3'e bakıldığında, bir elektrik fırını için tipik karbon oksijen eğrisi görülmektedir. Prob ile bir kez oksijen seviyesi belirlendikten sonra, C x O bağıntısı, eriyik karbonunu geriye doğru hesaplamada kullanılır<sup>6</sup>. Burada sensörün oksijen aktivitesini ölçtüğünü, ve fakat C x O bağıntısının, karbon/oksijen enjeksiyonunun etkinliği ve erimemiş hurdadan kaynaklanan lokalize yüksek karbon gibi birçok proses değişkeni ile etkilenebileceğini, not etmek önemlidir. Tablo II'de çeşitli çelik yapım prosesleri için tipik C x O değerleri gösterilmiştir.

**Tablo II: Çeşitli Çelik Yapım Prosesleri için CO Değeri**

Proses	CO Değeri	Oksijen. ppm @ 0.05% C
Q-BOP	15	300
LD-Top and Bottom Blow	20	400
LD-KTB	25	500
Top Blown BOF	30	600
EAF	32	640
Oxygen Enriched EAF	40	800



Şekil 3: EAF için Tipik Karbon Oksijen İlişkisi<sup>6</sup>

Karbon miktarının hesaplanmasında daldırma oksijen sensörlerinin kullanılması ile, geleneksel numune alma ile mukayese edildiğinde 2 ila 10 dakika arasında bir zaman kazancı mümkündür. Fırın ile sınırlanan bir EAF operasyonu için her dakika başına 3000\$ USD gibi averaj bir değerle hesaplandığında, sonuçtaki kazancın önemli olduğu görülecektir.

Sensör ölçümlerinin bir diğer avantajı, alaşım tüketiminin azaltılmasıdır. Dökümde bir oksijen sensör ölçümü yoluyla, o döküm için kesin alüminyum deoksidasyon planlamasını tespit etmek mümkündür. Gerekli şekilde uygun deoksidasyon, istenmeyen oksit bileşiklerinin meydana gelmesini önleyici, “temiz çelik” tekniğinin uygulanmasında sağlamış olur. Bu metodoloji, BOF fırınları ve potalarında alüminyum kaybı tekniği ile alüminyum kontrolü bölümünde derinlemesine irdelenmiştir.

### POTADA, ÇELİK VE CURUFUN OKSİJEN AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ

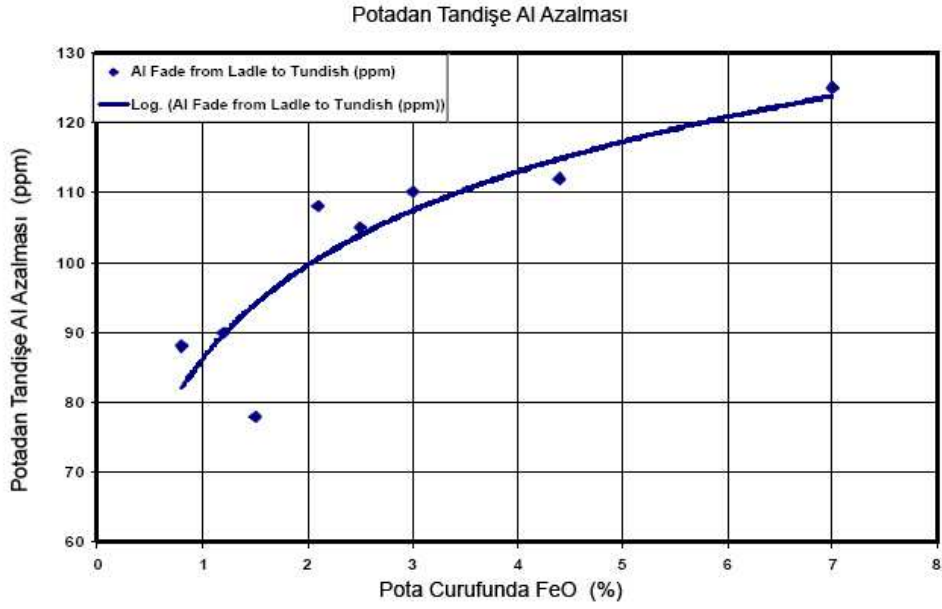
Yarı söndürülmüş veya tam söndürülmüş olarak dökülen çeliklerde, pota curufu oksijen aktivitesi ve potadaki çeliğin oksijen ölçümü kullanılabilir. Daha sonra bu ölçümler, hem alaşımlama hesaplamaları ve hemde curuf şartlandırma ilaveleri hususlarında pota metalurjisi işlemlerini belirler. Metalurjil operasyonlar sırasında metal-curuf reaksiyonları anahtar öneme sahiptir, (örneğin, LMF ısıtması ve ikincil metalurji reaksiyonları). Bu reaksiyonlar, eriyiğin kimyasal kompozisyonu ve çelik temizliğinin her ikisinde etkilidir. Bununla beraber, daldırma sensörler ve numune alıcılar kullanarak sıvı çelik sıcaklığı ve kimyasal analizi kontrol edilebilse, curuf oksijen aktivite sensörü geliştirilene kadar çevrimiçi curuf kontrolü mümkün değildi. Bu sensör gerçek zamanlı olarak curuf oksijen aktivitesini ölçer ki buradan, curuf hacmi bilindiğinde, pota curufunun içinde bulunan oksijen (FeO + MnO halindeki) miktarı hesaplanabilir. Bu yeni sensör tabanlı metodoloji, geleneksel curuf numunesi analizi için beklemler veya daldırılmış bir çubuğun ucunda katılmış çuruftan tam doğru olmayan görsel referanslar olmadan, pota curufunda kesin metalurjik düzeltmeler yapılabilmesini olanaklı kılar.

Curuf oksijen aktivitesi daldırma sensörleri ve onların çelik yapım pratiklerinde kullanımı için uygulamaları olan dört konu incelenecektir.

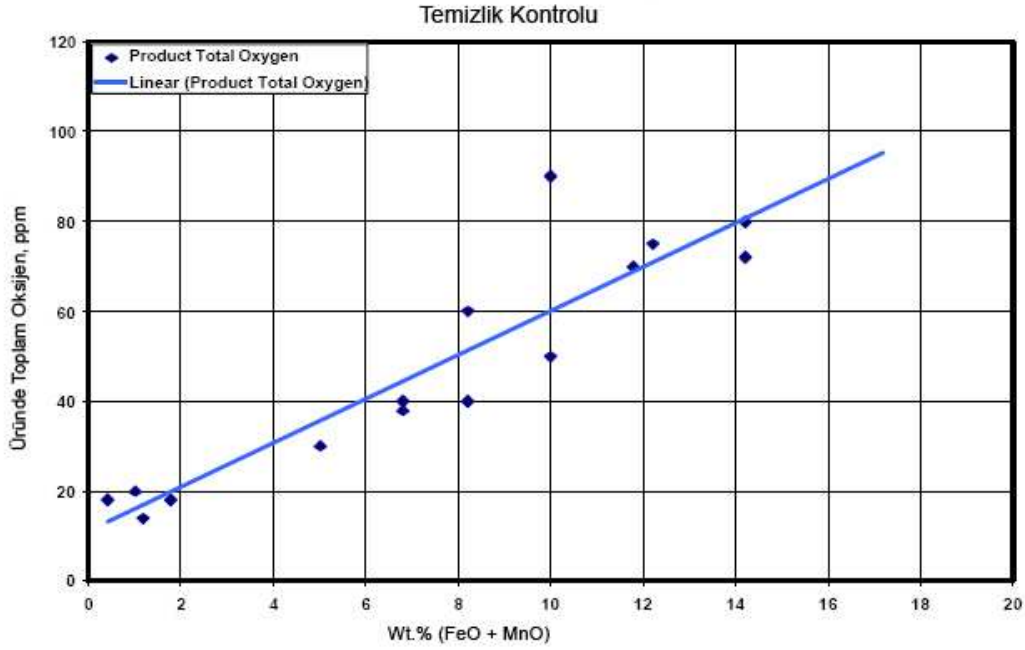
1. Alüminyum azalması
2. Temizlik ve inklüzyon kontrolü
3. Desülfürizasyon kontrolü
4. Nozul tıkanması

**Alüminyum azalması**, çelikteki çözülmüş alüminyum ile reaksiyona giren veya reoksitleyen, curuftaki aktif oksijenin bir fonksiyonudur. Fırın curufunun potaya taşınması, potadaki çeliğin reoksidasyonunda ana sebeplerden biridir. Tipik olarak, taşınan curuf, çeliğinkine daha uygun olacak şekilde, oksijen aktivitesini düşürmek için modifiye edilmeli veya seyreltilmelidir. Eğer pota curufu çelik ile denge halinde değilse, karıştırma, zamanla çelik ve curufu sonunda bir denge haline sokacaktır. Genelde sonuç olarak, çelik oksijen aktivitesinde bir yükselme olurken (curuf FeO'ini hafifçe düşürerek) eriyikteki çözülmüş alüminyumun bir kısmında  $Al_2O_3$  haline dönüştürülür.

Bu reaksiyon, çözülmüş alüminyumun kaybindan kaynaklanan alüminyum azalmasına sebep olur. Şekil 6'da görüldüğü gibi, curufta azalan FeO seviyeleri, sürekli döküm tandişinde ölçüldüğü gibi, alüminyum azalması miktarını düşürecektir.



Şekil 4: Curuf Oksijen aktivitesinin Fonksiyonu olarak Alüminyum azalması



Şekil 5: (FeO+MnO) Miktarının Fonksiyonu Olarak Temizlik<sup>7</sup>

**Çelik Temizliğine**, curuftaki FeO+MnO 'yu kontrol ederek çok katkı sağlanır. Çelik temizliği için müşteri talepleri giderek daha sıkı bir hale gelmektedir. Çelik üreticileride daha da temiz çelik üretebilmek için boğuşmaktadırlar. Bunu gerçekleştirebilmek için, çelikteki non-metalik inklüzyonların adet ve ebadını azaltmak zorunluluğu vardır. Çelik temizliğinin etkili olduğu bazı örnekler aşağıda sunulmuştur:

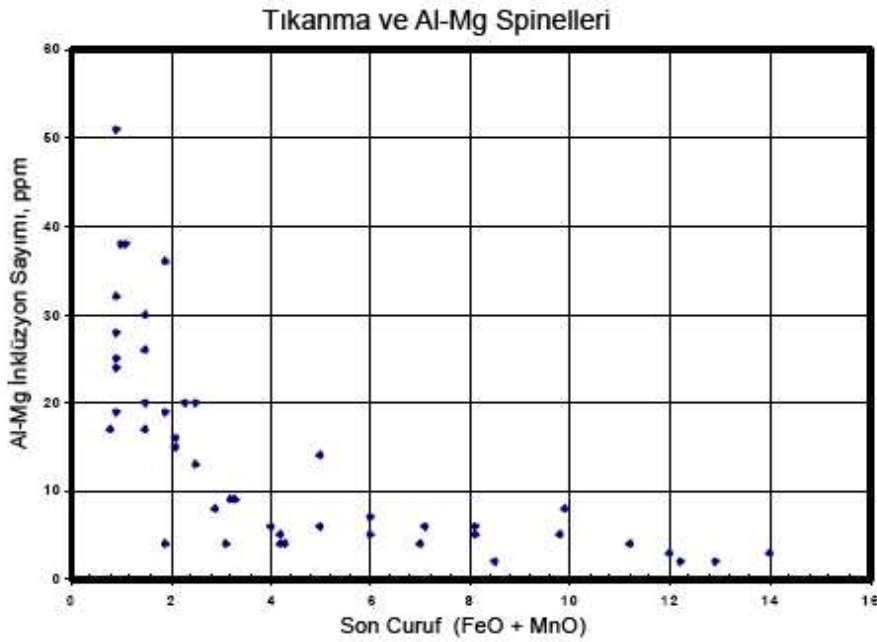


1. Oto lastik teli kalitelerinde çatlak ve tel kopuklukları.
2. Derin çekme D&I kutu ürünlerinde flanş çatlakları.
3. Bilyalı yatakların servis ömrü.
4. Son üründe "alumina sliver"i gibi yüzey kusurları.

Şekil 5, curuftaki FeO + MnO miktarının fonksiyonu olarak temizliği göstermektedir. Düşük karbonlu alüminyum ile söndürülmüş çelik sınıfında, katı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inklüzyonları temizlik sorununun başlıca sebebinin teşkil ederler.

**Pota desülfürizasyonunda** ( üst curuf veya enjeksiyonla yapılan) curuf oksijen aktivite ölçümlerinden yararlanabilen bir prosestir. Pota curufu sülfür kapasitesi, bazıklığı, viskozitesi, hacmi, sıcaklığı ve oksijen aktivitesi, çelik potasındaki desülfürizasyon prosesini etkiler. Curuftaki FeO + MnO 'nun çevrimiçi ölçümü, curufun oksidasyon durumunun eş zamanlı ayarlamalarla kontrol edilebilmesini sağlar. Curufun oksidasyon durumunun optimize edilmesi, etkili kükürt eliminasyonunu geliştirecektir. Bu pratik sonucunda, muamele zamanı azaltılır ve çelik potasında hedeflenen son kükürt seviyesine ulaşmak daha emin hale gelir.

**Sürekli döküm nozul tıkanması**, pota curufunun FeO miktarından etkilenir. Curuf oksijen aktivitesi ( FeO) ile sürekli döküm nozulunun tıkanma temayülü arasında, Şekil 6'de gösterildiği gibi, kuvvetli bir bağıntı vardır. FeO + MnO miktarı %2'nin altına düştüğünde, tıkanma eğilimi artmaktadır. Bu, sürekli dökümde nozulda biriken katı MgO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel (lal taşı) inklüzyonları formasyonu nedeniyle<sup>8</sup>.



Şekil 6: Düşük (FeO+MnO) miktarlarında MgO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel formasyonu eğilimi<sup>7</sup>

Geçmişte, operatörlerin curuf oksidasyon seviyesi hakkında, anında bilgi edinebileceği bir yol mevcut değildi. Önceden, curufun oksijen aktivitesini belirleyebilmek için, numune kepeği veya bir çubuk ile katı bir numune elde edilip, bu daha sonra analiz için kimya laboratuvarına yollanırdı (veya görsel olarak incelenirdi). Curuf oksijen aktivite sensörünün, geniş bir aralıkta curuf oksidasyon (FeO+MnO) durumunu kesin olarak belirleyebilmesi, sensör-bazlı pota curuf yönetim prosesleri için güçlü bir durum oluşturmaktadır.

### EAF FIRINI CURUF FeO TAYİNİ

Curuf oksijen aktivite ölçümleri için bir diğer uygulama, EAF fırın curufunun FeO miktarını belirlemektir. Modern oksijence zengin bir EAF prosesinde, fırının curuf oksijen aktivitesi ve meydana gelen FeO miktarı dinamiklidir. Aşırı ısıtma periyodunda, curuf oksijen aktivitesi, oksijen/karbon enjeksiyonu, yanmış kireç ve/veya MgO ilavesi uyarlamasıyla etkilenebilir. Sensör ölçümü, fırının curuf yönetim sistemi için ampirik veya bir önceki dökümden veya hatta bir önceki günün operasyonundan veri ekstrapolasyonu olmayan, anında geribildirim sağlanmasında kullanılabilir<sup>7</sup>. Tablo III, curuf FeO yüzdesinin fonksiyonu olarak değişik hacimlerdeki dökümlerin FeO miktarlarını ve metalik verim kayıplarını göstermektedir. Bu tablo için %30 FeO baz durumu olarak alınmıştır. Toplam curuf ağırlığı, sıvı çelik ağırlığının %10'u olarak kabul edilmiştir.

**Tablo III: Değişik Fırın Hacim ve FeO miktarları için FeO ile kaybedilen Verim**

Fırın Hacmi (tons)	Curuf Mik. (tons)	30% FeO (tons)	40% FeO (tons)	50% FeO (tons)	60% FeO (tons)
100	10	0	.6	1.2	1.8
150	15	0	.9	1.5	2.4
200	20	0	1.2	2.0	3.2
250	25	0	1.5	2.5	4.0

Demir bileşiği olarak kaybedilen verim miktarını hesaplamada bu değerler kullanılarak, ve bir ton sıvı çelik bedeli \$300 kabul edilerek, aşağıdaki Tablo IV, fırın curufunun FeO miktarındaki değişimin maliyete etkisini göstermektedir.

**Table IV: Çeşitli Fırın Hacmi ve FeO Miktarların için Maliyet Etkisi (USD)**

Fırın Hacmi (tons)	Curuf Mik (tons)	30% FeO \$USD/Döküm	40% FeO \$USD/Döküm	50% FeO \$USD/Döküm	60% FeO \$USD/Döküm
100	10	0	\$180	\$360	\$540
150	15	0	\$270	\$540	\$810
200	20	0	\$360	\$720	\$1080
250	25	0	\$450	\$900	\$1350

Aşırı yüksek pota curufu FeO 'nin daha sonra döküm ve sevkiyata hazırlama safhalarındaki proseslerde zararlı etkisi olduğu görülmüştür. Daha yüksek curuf FeO' i ile sliver tipi kusurların arttığı iyi bilinmektedir. Yüksek curuf oksijen aktivitesinin, kalite maliyeti üzerinde de benzer etkisi vardır. Tablo V' de, yarı mamul slab için karın \$20USD/ton ve skarf içinde %2 verim kaybı olduğu kabul edilerek, makina skarf prosesinde bir maliyet analizi gösterilmektedir.

**Tablo V: USD Olarak,Çeşitli Pota Curuf FeO miktarları için Skarf Kayıpları**

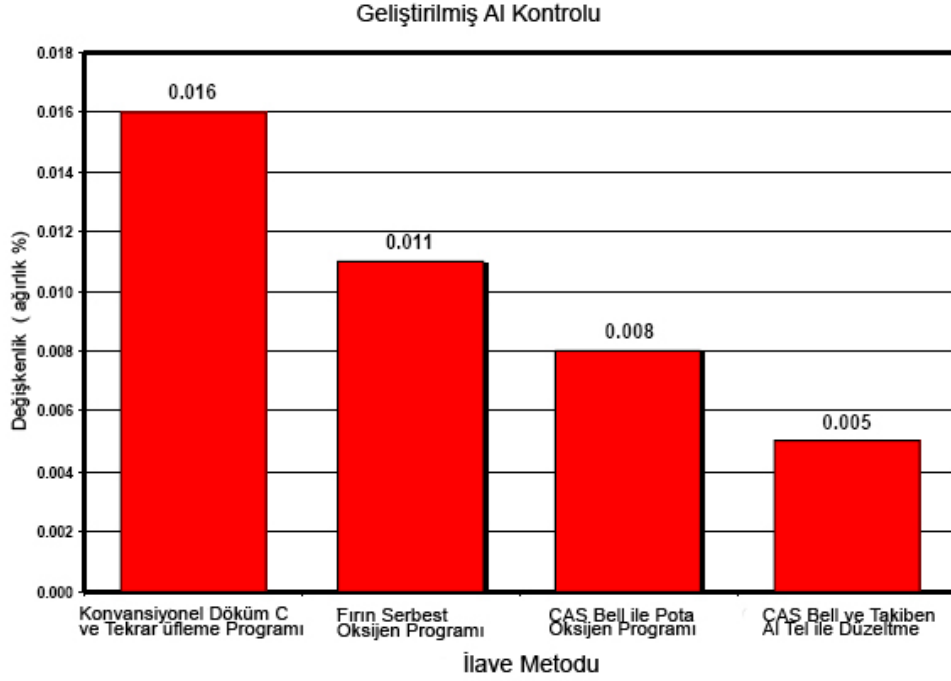
Çelikhane (yıllık kapasite , tons)	Scarfig aynı kalırsa	5 % Skarfıta azalma	10 % Skarfıta azalma	15 % Skarfıta azalma	20 % Skarfıta azalma
1 million	\$0	\$20,000	\$40,000	\$60,000	\$80,000
2 million	\$0	\$40,000	\$80,000	\$120,000	\$160,000

### ALUMİNYUM KAYBI TEKNİĞİ İLE ALUMİNYUM KONTROLÜ

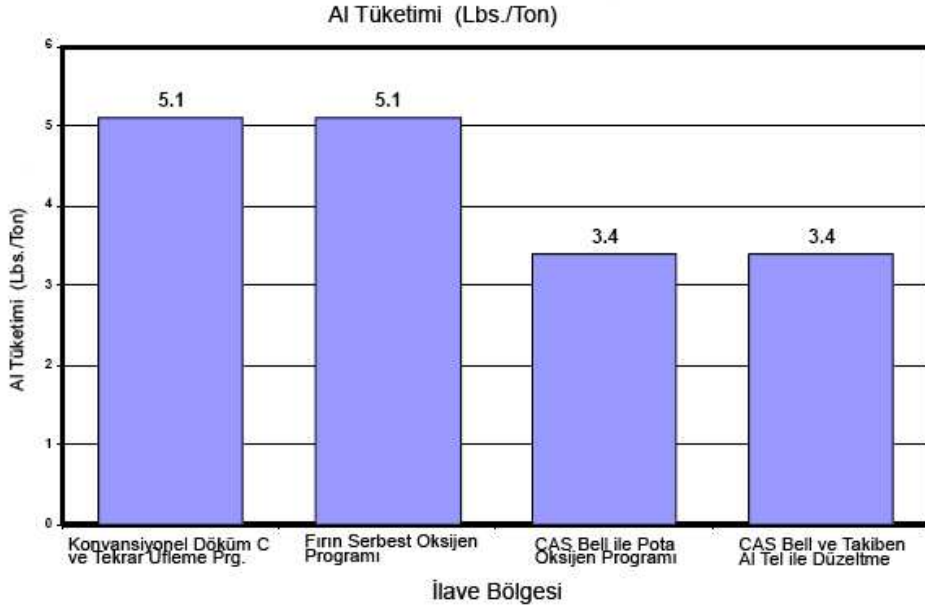
Daha öncede belirtildiği gibi, BOF, EAF veya LMF fırınlarının herhangi birinden döküm öncesi oksijen veya gelen pota oksijeni, döküm sırasındaki alüminyum ilavelerini hesaplamakta kullanılabilir. En yüksekten en düşük alüminyum değişimine, çeşitli pota alüminyum ilavesi belirleme metodları şöyledir: 1) fırın döküm karbonu ve/veya tekrar üflemler; 2) fırın final oksijeni; 3) örtüsüz, söndürülmemiş pota oksijeni; ve son olarak 4) açık pota alüminyum ilavesini takiben sensör bazlı alüminyum ayarlaması. İlk iki metod döküm sırasında alüminyum ilavesini kapsarken son iki ilave dökümden sonra potaya yapılır.

Açık, söndürülmemiş çeliğe alüminyum ilave etmenin bir yaygın metoduda CAS prosesidir (Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling-Sızdırmaz argon karıştırma ile kompozisyon ayarlaması). Burada döküm açık yapılır; poroz tapadan argon verilir ki bu curufta bir açıklık (göz) yaratır. Sonradan, seramik bir çan kullanarak, alüminyum pota yüzeyindeki bu açık bölgeye ilave edilir. Alüminyum ilavesi, sadece dökümden sonraki pota oksijen miktarına dayanan bir düzenleme ile belirlenir. İlave bir gelişim olarak, açık pota ilavesini takiben alüminyum tel besleme ile ayarlama yapılabilir ki bu ayarlama yine pota oksijen miktarına dayandırılır(pota alüminyum miktarı çıkarsaması). Pota oksijen sensörünün icadından evvel, gerekirse daha fazla alüminyum ilavesi yapılabilirdi diye, alüminyum miktarı teyidi için pota sekiz dakika kadar fırında alıkonulmalıydı.

Trout9'dan alınan aşağıdaki grafik, çeşitli ilave metodlarıyla, final alüminyum miktarındaki değişkenliğin (i.e. standart sapma) nasıl azaltıldığını göstermektedir.



**Şekil 7: Çeşitli Al İlave Metodları için Geliştirilmiş Al Kontrolü<sup>7</sup>**



**Şekil 8: İlave Bölgesine göre Al Tüketimi<sup>9</sup>**

Dolu potaya alüminyum ilavesi sadece alüminyum değişkenliğini azaltmaz, aynı zamanda döküm için gerekli alüminyum miktarında önemli ölçüde azalır. Bu durum Şekil 8'de gösterilmiştir. Döküm alma sırasında potaya alüminyum ilavesindeki ton çelik başına alüminyum sarfiyatı 5.1 lbs./ Short Ton dur. Alüminyumun dökümden sonra potaya ilavesiyle bu tüketim ton çelik başına 3.4 lbs./short ton'a geriler. Sonuç, short ton (907 kg) çelik başına 1.7 lbs alüminyum tasarrufudur. Aşağıdaki döküm C/tekrar üfleme ve fırın ve pota oksijeni çizelgesi ve Tablo VI dökümden sonra potaya ilave edilmesi gereken alüminyum miktarındaki azalmayı göstermektedir. Averaj alüminyum ilavesi, dökümün fırındaki oksijen miktarına dayanır veya ton çelik başına 5.1 lbs./short tondur. Bu döküm başına 725 lbs. alüminyum azalması veya ton çelik başına 3.4 lbs. alüminyumdur. Bu da potada ilave edilmesi gereken alüminyumda 1/3 azalmadır. Açık bir döküme alüminyum potada ilave ederken sonuç daha tutarlı bir alüminyum değeridir, ve ilaveten alüminyum tüketimi 1/3 oranında veya 1.7 lbs Al/ton kadar azalır.

Bunun bir örneği Tablo VI. da verilen alüminyum programında görülmektedir.

**Tablo VI: Fırın ve Pota için Döküm C/Tekrar üfleme ve Oksijen Prob tabanlı Alüminyum ilave Programları<sup>12</sup>**

### Alüminyum İlave Programları

<b>Döküm Karbonu Programı</b>		
<b>Döküm C</b>	<b>T.Üfleme Yok</b>	<b>T.Üfleme</b>
.048/.050	950	1000
.043/.047	950	1050
.038/.042	1000	1100
.033/.037	1075	1150
.028/.032	1100	1175
.025/.027	1125	1225
< 0.025	1150	1250

<b>Fırın Oksijen Programı</b>	
<b>Oksijen, ppm</b>	<b>Total Al. Lbs.</b>
402/442	950
443/484	975
485/527	1000
528/567	1025
568/609	1050
610/650	1075
651/692	1100
692/724	1125
735/775	1150
776/817	1175
818/859	1200
860/900	1225
901/942	1250
943/983	1275
> 983	1300

<b>Pota Oksijen Programı</b>	
<b>Oksijen, ppm</b>	<b>Total Al. Lbs.</b>
<	550
59-116	575
117-174	600
175-232	625
233-291	650
292-349	675
350-407	700
408-465	725
466-523	750
524-581	775
582-639	800
640-697	825

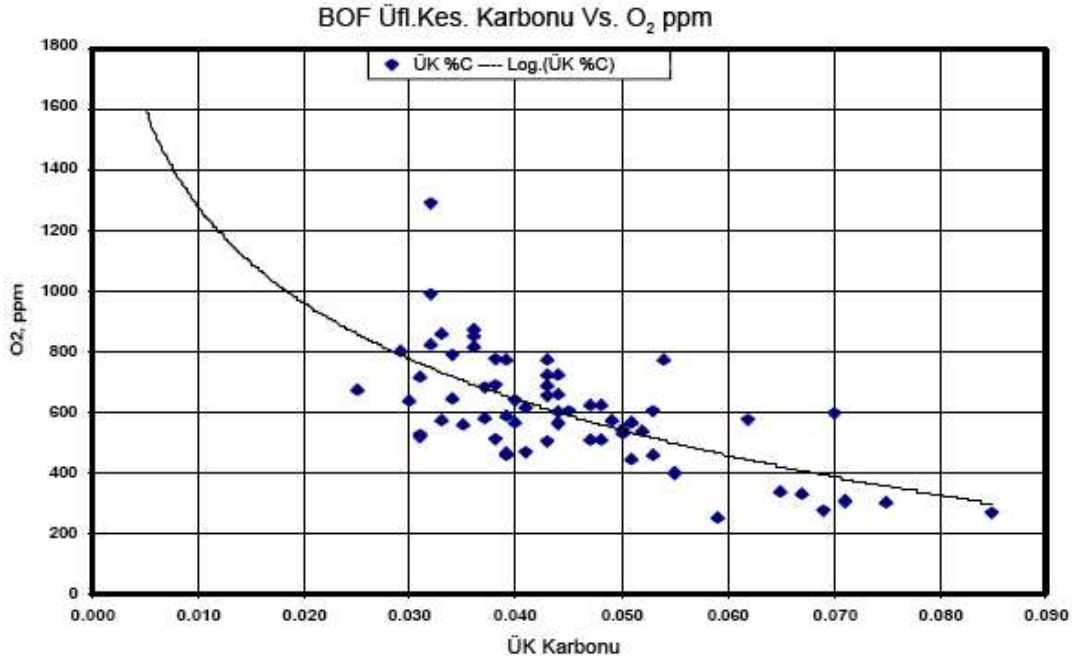
### ALUMİNYUM KAYIP HESAPLAMASI – OKSİJEN SENSÖR–TABANLI FIRIN ALUMİNYUM İLAVE PROGRAMI

Aşağıdaki metod, fırındaki yahut potadaki oksijenin fonksiyonu olarak alüminyum ilavesinin hesaplanmasında kullanılır. Geçmişte, dökümden sonra çelik potasındaki belli bir hedef alüminyuma erişmede gerekli pota alüminyum ilavesini tahmin için, üfleme kesme karbonu ve tekrar üfleme geçmişi birlikte kullanılırdı.

Tablo VI, tipik bir döküm karbonu/ tekrar üfleme programını göstermektedir. Görüldüğü gibi, üfleme kesme karbonu ve tekrar üflemlerin her ikisinde, dökümde çelik banyosundaki oksijen seviyesini tahminde faydalı olmaktadır. Bu nedenledirki, bunlar alüminyum ilaveleri için bir temel olarak kullanılırlar. Bununla beraber, banyonun oksijen seviyesini tahmin yaklaşımından ziyade, daldırma bir oksijen probu ile kesin değer elde edilebilir. Bu değer, çelik potasındaki hedeflenen alüminyum için belirlenen pota alüminyum ilavesini tayinde kullanılabilir. Daha detaylı bir açıklama şu şekilde yapılabilir:

Çeliğe alüminyum ilave edilirken, alüminyumun çoğunluğu, ya çelikte mevcut serbest oksijenin veya curuf veya dökümden kaynaklanan oksitlerin uzaklaştırılması sırasında oksijenle birleşir. Atmosferik oksijenle olan oksidasyon çıkarıldıktan sonra, geriye kalan alüminyum, çelikte residüel alüminyum (Hedef Al) olarak kalır. Tipik olarak, düşük karbonlu çelikler için, alüminyumun yaklaşık %24'ü çelikte kalır; alüminyumun %38'i çelikteki serbest oksijeni elimine eder; ve alüminyumun %38'i dökümle ilgili veya curuf redüksiyonundaki kayba gider.

Sensörden alınan bilgi kullanılarak residüel alüminyumun hesaplanma metodolojisi EK’te izah edilmiştir.



Şekil 9: BOF Üfleme Kesme Karbonu vs. Oksijen, ppm<sup>6</sup>

Şekil 9, BOF ‘te karbon ile oksijen arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tipik olarak, düşük karbon bölgelerinde çok daha yüksek oksijen değerleri vardır. Maalesef, bu tahmini oksijenin oldukça yüksek 76.2 veya % 13.2 standart hatası vardır. Karbon seviyesine bağlı olarak, bir tekrar üfleme, averajda, 100 ila 120 ppm daha ekler. Bu nedenle, üfleme kesme karbon seviyesi ve tekrar üfleme geçmiş çelik banyosundaki oksijenin tahmininde kullanılabilir, fakat bu metod, tekrarlanabilir pota alüminyum sonuçları sağlamakta gerekli hassasiyetten yoksundur. Her iki alüminyum programında benzerlikler mevcuttur; ancak, daldırma probtan alınan kesin eriyik oksijen miktarı çok daha hassas bir değerdir. Bu kritik bir noktadır, çünkü kullanılan alüminyumun %38 ila %47 ‘si bu oksijen değerine dayanır (düşük vs. yüksek karbonlu dökümler). Tekrar, detaylı bir izah için Ek’e bakınız.

Sonuç olarak, daldırma oksijen probu, üfleme kesme karbonu ve tekrar üfleme geçmişinden daha kesin bir banyo oksijeni ölçümü sağlarken, bu ölçüm daha sonra, verilen hedef pota alüminyum değerine ulaşmak için doğru miktarda alüminyum ilavesi yapmak için güvenle kullanılabilir.

### Özet

Hassas ve güvenilir daldırma sensörleri modern çelik üretiminde proses kontrolü üzerinde bir etki yaratmıştır ve bu etki devam edecektir. Bunlar, çelik üretim prosesinde hızlı çevrimiçi karar üretiminde temel teşkil etmektedir. Uygulamalar, sıcak metalde silis ve kükürt tayininden, fırının oksidasyon durumunun kontrolüne, ve curuf oksijen yönetimine kadar geniş alanı kapsar.

Özellikle, çelik üretim prosesinde zaman, sıcaklık, verim ve kalite geliştirmek için birkaç örnek belirtilmiştir. Sıcak metalde silikon ve kükürt problemleri kullanılarak, 14 dakikalık zaman kazancı ve 17 °F’lık sıcaklık kazancı potansiyeli mevcuttur. BOF fırınında, sublans veya TO daldırma sensörlerin kullanımı, sıcaklık ve kimya için fırın yatırılmayı neredeyse elimine edebilmektedir. Bunun sonucunda fırında, % 1.5 verim kazancı, dökümden-döküme geçen zamanda 10-dakikalık ve yaklaşık 30 °F’lık bir kazanç söz konusudur. Bunlara ilaveten, % 80 sıfır fırın yatırılmalı döküme ulaşıldığında, refrakter ömründe % 20 artma gözlemlenmiştir. EAF ‘da, oksijen problemleri, laboratuvar analizleri için bekleme olmadan, fırın karbon miktarının tayini için daha doğru ve kestirme bir metod sağlamaktadır. Curuf oksijen aktivite sensörleri EAF fırınlarındaki FeO’i hesaplayabilir ve sonuçta verim geliştirilir.

Pota sensörleri proses zamanını azaltabilir, çelik temizliğini geliştirir, ve sıcaklığı korur. Pota oksijen aktivite sensörleri, açık ve söndürülmüş çeliklerde gereken alüminyum ilave miktarlarının hesaplanması için bir metod sağlayabilir. Buna ilaveten, önemli kalite geliştirmeleri vardır. Dökümden sonra, açık dökümden pota oksijen probuyla birlikte, tel besleme operasyonunda alüminyumun ince ayarı için çelik söndürüldükten sonra alınan prob, alüminyum değişkenliğinde, % 0.005 standart sapmaya kadar, gelişim sağlar. Gerçek zamanlı sensör-bazlı pota curuf yönetimi, üretim hattı boyunca çelik kalitesini artırabilir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu yeni sensörleri yıllar içinde endüstriye tanıtmak için gerekli tesis değerlendirmelerindeki işbirliği ve destekleri için, endüstrinin her kesimindeki çalışma arkadaşlarına teşekkürlerini bildirirler.

## REFERANSLAR

1. R. Stone, D. Habets, R. Maes, P. Koros, "Impact of New On-Line Hot Metal Silicon and Sulfur Sensors on Iron Transfer Operations, Iron Desulfurization, and Overall BOF Shop Productivity", *Proceedings, AISTech, 2004*, pg 701.
2. P. J. Koros, "Pretreatment of Hot Metal", *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 11th Edition, Chapter 7, AISE Foundation, Pittsburgh, PA..
3. R. Cameron, G. Cuthill, I. Deeks and R. Minion, "Productivity Improvements at Stelco Hamilton with Limited Hot Metal", *Proceedings, 32nd McMaster Symposium on Iron & Steelmaking*, April 20, 2004, pg. 172.
4. J. Kaminski, H. Kossler, P. Koros, "Lime and Magnesium Co-Injection for Efficient Desulfurization of Hot Metal in Transfer Ladles", *Steelmaking Proceedings, Iron and Steel Society*, vol. 68 (1985) p333.
5. C. Dubois, F. Leelercq, R. Schutz, J. Huber, "Development of the Scrap Ratio at the Sollac Lorraine Steelshop", Florange, France, *Proceedings, 32nd McMaster Symposium on Iron & Steelmaking*, April 20, 2004, pg. 114.
6. R. Branion, Internal Report, Heraeus Electro-Nite, 2004.
7. W. Glitscher, R. Maes, "Instant Control of Metallurgical Slags in EAF & Ladle Utilizing an Electro-Chemical Sensor", *PTD Proceedings, Iron and Steel Society*, March 2003 pg. 883.
8. K. C. Ahlborg, "Relationship Between Ladle Furnace Slag Oxygen Potential and Contamination of Alumina Inclusions by MgO and CaO", *Proceedings, Fifth International Conference on Clean Steel*, Balatonfüred, Hungary, June, 1997.
9. C. Trout, D Peterson, S. Hughes, "Improved Control of Ladle Aluminum Analysis for Low Carbon Aluminum-Killed Steel", *AISE Conference Proceedings*, Pittsburgh PA, 1983.

## EK

Bu bölümde, sipariş edilen alüminyum seviyelerini elde etmek için gereken alüminyum ilavesini hesaplamada, oksijen sensör bilgisinin manipülasyonu detaylı olarak anlatılmaktadır.

590,000 lbs. ağırlığında bir döküm ve % 0.050 alüminyum hedefi için aşağıdaki hesaplamalar uygulanır:

$$590,000 * \text{hedef Al \%} = \text{gerekli Al} \quad (2)$$

$$590,000 * 0.050\% = 295 \text{ lbs. gerekli Al} \quad (3)$$

Bu aynı zamanda çelikteki rezidüel alüminyum olarak adlandırılır.

Bundan sonra, çelik banyosundaki serbest oksijenin temizliği için gerekli hesaba bakalım. Bu normal Al-oksijen reaksiyonuna göre ele alınır:



Ağırlık bağıntılarına göre,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  'de oksijenin alüminyuma göre yaklaşık 1:1.125 gibi bir oranı vardır (48/54). Bunun anlamı 1.0 pound oksijenle reaksiyona girmek için 1.125 pound alüminyum gerektiğidir. Serbest oksijenin alüminyum ile elimine edildiği çelik banyosundaki reaksiyon yönünden, bu önemlidir. Her bir ppm oksijen, 1.125 ppm alüminyumla reaksiyona girer.

Şimdi kısaca ppm'in yüzdeye çevrilmesine bakalım:

$$1 \text{ ppm} = 0.0001\% \quad (5)$$

$$10 \text{ ppm} = 0.0010\% \quad (6)$$

$$100 \text{ ppm} = 0.0100\% \quad (7)$$

$$1000 \text{ ppm} = 0.1000\% \quad (8)$$

Tipik olarak, çelikteki oksijen 200 ppm ila 1400 ppm aralığındadır. Bu nedenle, bulunduğumuz oksijen aralığı çelikte %0.020 ila %0.140 oksijen civarlarıdır. Her pound oksijen için, 1.125 pound alüminyuma ihtiyacımız olduğunu bildiğimizden, alüminyum, ağırlık olarak % 0.0225 ila % 0.1575 aralığında olmalıdır. Çelikteki oksijenle reaksiyona girmek için gerekli alüminyum ağırlığına ulaşmak için, alüminyumun ağırlık yüzdesini belirleriz, ve sonra bunu döküm ağırlığımız olan 590,000 pound ile çarpırız.

Fırın oksijeni 500-ppm olan bir fırında, oksijenle reaksiyon için gerekli alüminyum miktarı aşağıda hesaplanmıştır:

$$500 \text{ ppm O}_2 = 0.0500\% \text{ O}_2 \quad (9)$$

$$0.0500\% \text{ O}_2 * 1.125 \text{ (lbs. Al/ lbs. O}_2) = 0.05625 \% \text{ Al} \quad (10)$$

$$0.05625\% \text{ Al} = 0.0005625 \text{ Al} \quad (11)$$

$$0.0005625 * 590,000 = 331.875 \text{ lbs. Al} \quad (12)$$

$$\text{Or } 562.5 * 0.590 = 331.875 \text{ lbs. Al} \quad (13)$$

Şimdiye kadar, kullanılan alüminyumun yüzde altmış-ikisinin izahı yapılmıştır. Bu miktar çelikteki rezidüel alüminyum toplamıdır; örneğin % 0.050 Al, ve fırındaki oksijenin elimine edilmesi için gerekli alüminyum. Geriye kalan alüminyumun belirlenmesi diferansiyel ile başarılabilir. Örneğin, eğer 1,000 pound alüminyum kullanılmışsa ve bunun şimdiye kadar 600 poundunun nereye gittiğinin hesabı verilmişse; o zaman, 400 lbs 'luk hesabı verilemeyen döküm sırasında kaybolan alüminyum vardır. Bu her döküm için yapılmış ve ilave edilen alüminyum ile hesabı verilebilen alüminyum arasındaki fark hesaplanmıştır. Bu alüminyum farkı veya döküm sırasındaki kayıp averajı 406.5 lbs., veya dökümün %38'i olarak bulunmuştur<sup>21</sup>. (NOT: Alüminyum çubuklar sadece %90 alüminyum içerir; bu nedenle, ilave edilen esas alüminyumu bulmak için, ilave alüminyum ağırlığı 0.90 ile çarpılmalıdır. Benzer şekilde, alüminyum hesaplaması tamamlandıktan sonra, kaç pound alüminyum çubuk ilavesi gerektiğini bulmak için, final alüminyum rakamı 0.90'a bölünmelidir.)

Final alüminyum hesaplaması için, aşağıdakiler yapılır:

$$\text{Çelikteki rezidüel Al} + \text{Fırındaki O}_2 \text{ eliminasyonu için Al} + \text{Döküm kaybındaki Al} = \text{Toplam Al} \quad (14)$$

Eğer hedef Al %0.050 ise, 590,000 lbs. döküm ağırlığı varsa, ve fırın oksijeni 782 ppm ise, hesaplama şu şekildedir:

$$\text{Çelikteki Rezidüel Al} = 0.00050 * 590,000 = 295 \text{ lbs. Al} \quad (15)$$

$$782 \text{ ppm O}_2 = 0.0782\% \text{ O}_2 \quad (16)$$

$$0.0782\% * 1.125 = 0.0880\% \text{ Al} \quad (17)$$

$$0.00088 * 590,000 = 519.2 \text{ lbs. Al} \text{ -Fırındaki O}_2 \text{ Eliminasyonu için} \quad (18)$$

Bundan sonra, bu iki hesaplama, bilinen, döküm sırasındaki fırın kaybı averajı 406.5 pound ilavesi yapılır. Elde edilen:

$$295 + 519.2 + 406.5 = 1220.7 \text{ lbs. Al} \text{ Gerekir} \quad (19)$$

$$\text{Pounds alüminyum Çubuk} = 1220.7/0.90 = 1356.3 \text{ lbs. Al} \text{ Çubuk} \quad (20)$$

Pota alüminyumu için hesaplamada çok benzer şekildedir. Ancak, oksijen değeri daha düşük olacaktır ve alüminyum kayıp sabiti yaklaşık olarak 1/3 daha düşük veya yaklaşık 272 lbs. Al 'dur. Al düzeltmesiyle (trim) % 0.005 Al Standart sapmaya ulaşılabilmiştir.